第 38 卷第 5 期
2018 年 3 月
生 态 学 报
ACTA ECOLOGICA SINICA
Vol.38,No.5
Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201702100233
赵晓东,李廷亮,谢英荷,余高,岳丽,高慧洲,加武斌.覆膜对旱地麦田土壤水分及氮素平衡的影响.生态学报,2018,38(5):1550-1559.
Zhao X D, Li T L, Xie Y H, Yu G, Yue L, Gao H Z, Jia W B.Effect of plastic film mulching on soil water and nitrogen balance in dryland wheat fields. Acta Ecologica Sinica,2018,38(5):1550-1559.

覆膜对旱地麦田土壤水分及氮素平衡的影响

赵晓东[1,2],李廷亮[1,*],谢英荷[1],余 高[1],岳 丽[1],高慧洲[1],加武斌[1]
1 山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801
2 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191

摘要:通过大田试验研究了平膜穴播和垄膜沟播等覆膜方式对晋南旱地麦田土壤水分、氮素平衡及产量的影响,以期在当地确立一套适宜的科学覆膜方式,为晋南旱塬地区乃至我国旱作小麦的高产优质提供理论依据。结果表明,垄膜沟播和平膜穴播处理的冬小麦增产效果显著,且以平膜穴播处理的效果最优,较测控施肥处理的籽粒产量和生物产量分别提高 22.71%和25.45%。经过冬小麦一个生育期对土壤水分的吸收利用,两种覆膜处理的耗水量较不覆膜处理有较大的提高,而其水分利用率略低于不覆膜处理,但差异不显著。两种覆膜处理也能提高麦田的降水生产效率和休闲效率,较不覆膜处理分别提高 9.46%—30.16%和 9.95%—39.22%。覆膜有利于氮的矿化,并能促进小麦对氮素的吸收利用,同时也可以在一定程度上降低氮素在土壤中的残留,最终有利于小麦增产。

关键词:旱地小麦;产量;地膜覆盖;水分利用率;氮素平衡

Effect of plastic film mulching on soil water and nitrogen balance in dryland wheat fields

ZHAO Xiaodong[1,2], LI Tingliang[1,*], XIE Yinghe[1], YU Gao[1], YUE Li[1], GAO Huizhou[1], JIA Wubin[1]
1 *College of Resources and Environment*, *Shanxi Agricultural University*, *Taigu* 030801, *China*
2 *Agro-Environmental Protection Institute*, *Ministry of Agriculture*, *Tianjin* 300191, *China*

Abstract: Soil moisture and nitrogen are two major factors that limit wheat yield in northern China. Previous studies have investigated the effects of different film mulching methods on soil water, nitrogen balance, and yield in dryland wheat fields. The present study consisted of four treatments, including farmer mode (no film mulching), a control treatment (no film mulching), and two film mulching methods, either ridge film furrow sowing or flat film dibbling. We aimed to identify a suitable film mulching method for Loess Dryland Plateau and to establish a theoretical basis for producing high-yield and high-quality wheat in southern Shanxi, as well as in other areas in China. The results indicated that ridge film furrow sowing and flat film dibbling increased winter wheat yield and that the effect of flat film dibbling was greater. Compared with the control treatment, the grain and biological yields of the flat film dibbling treatment increased by 22.71% and 25.45%, respectively, and grain yield was also positively correlated with spikes per hectare (correlation coefficient = 0.838), indicating its importance in increasing grain production. The water consumption of ridge film furrow sowing and flat film dibbling treatments were higher than the other treatments during the whole growth period, whereas their water use efficiency was slightly lower, although not significantly. Interestingly, compared to the farmer and control treatments, film-mulched winter wheat absorbed more water from deep soil (100—200cm). More specifically, the deep soil water that was consumed by the ridge film furrow sowing wheat accounted for 48.88% of the total soil water storage, whereas that of the control

基金项目:公益性行业(农业)科研专项(201303104,201503124)
收稿日期:2017-02-10; **网络出版日期**:2017-11-21

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: litingliang021@126.com

treatment only accounted for 35.75%. Plastic film mulching also increased the rainfall production and leisure efficiencies of wheat fields by 9.46%—30.16% and 9.95%—39.22%, respectively. Plastic film mulching promotes the mineralization of nitrogen, which can promote the absorption and utilization of nitrogen by wheat, reduce the residual nitrogen of soil, and increase the yield of winter wheat. Overall, both ridge film furrow sowing and flat film dibbling effectively improved the uptake and utilization of soil water and nitrogen by winter wheat, thereby increasing the yield of winter wheat. The observation that film mulching promotes the utilization of deep soil water by winter wheat should be investigated further, so as to better evaluate characteristics of soil moisture consumption in different soil layers.

Key Words: dryland wheat; yield; plastic film mulching treatment; water use efficiency; nitrogen balance

旱地小麦占全国小麦种植面积的 55%—60%,达 22645×$10^3$$hm^2$左右,是北方干旱半干旱地区的主要粮食作物之一。我国北方地区地下水位较深,一般不能直接参与土壤-植物—大气(SPAC)水分循环,也无灌溉条件,自然降水是旱地麦田土壤水分的主要来源[1],是典型的雨养农业地区。邓振镛等[2]调查研究发现,北方地区能被农作物吸收利用的降雨仅占总降雨量的 20%—25%,60%—70% 的降雨因无效蒸发而损失[3],10%—15%形成地表径流而损失。同时,降雨量年际变化率大且分布不均,7—9 月份的降雨量占全年降雨量的 50%左右[4]。因此,在降雨量稀少、季节分布不均和供需错位等自然环境条件下,水分胁迫已经成为我国北方地区的主要限制因子之一[5]。

氮素是植物必需的大量营养元素,是限制植物生长和形成产量的首要因素[6],硝态氮作为旱地小麦吸收利用的主要氮素来源,在冬小麦生产过程中发挥着关键的作用。已有研究表明[7-8],耕层土壤的硝态氮均能不同程度地反映土壤的供氮能力,但其相关系数并不高,因此对 2m 土层剖面硝态氮进行监控具有一定的研究价值。同时,研究氮肥施入土壤后的转化和去向,可以为农田土壤合理施肥提供一定的理论依据[9]。因此对土壤中氮素的输入输出情况进行动态监测具有一定的理论和实际意义。目前,国内外关于农田土壤氮素平衡的研究主要集中于施氮量的不同[9-12],而对不同覆膜方式影响土壤中氮素平衡的研究相对较少,且具有地域差异性。同时,多数研究主要关注覆膜对农田土壤耕层水分利用的影响,而关于降水生产效率、休闲效率及覆膜对深层土壤水分变化利用的影响关注较少。因此,本试验以山西晋南旱塬麦田长期定位试区为依托,进行了不同覆膜方式对旱地麦田 2m 深层水分及氮素平衡影响的研究,以期为旱地麦田高产高效提供科学的理论依据和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　试验地概况

本试验于 2014—2015 年度在山西省洪洞县刘家垣镇东梁村旱地冬麦区进行,该区域属于暖温带大陆性季风气候,年平均日照时数在 2419h 左右,有效积温 4700℃,年平均气温在 12.6℃左右,无霜期 180—210d,冬小麦生育期降雨量为 95.90mm(表 1)。

表 1　冬小麦生育期降雨量/mm

Table 1　The rainfall during the growth period of Winter Wheat

10 月 October	11 月 November	12 月 December	1 月 January	2 月 February	3 月 March	4 月 April	5 月 May	总计 Total
10.90	6.20	0.00	4.20	3.30	0.50	38.60	32.20	95.90

供试土壤类型为石灰性褐土,质地为中壤土,pH 为 7.59,耕层土壤有机质含量为 14.35g/kg,全氮为 0.75g/kg,硝态氮为 12.25mg/kg,有效磷为 12.61mg/kg,有效钾为 235.66mg/kg,CEC 为 31.17cmol/kg,0—20、20—40、40—60、60—80cm 土壤容重分别为 1.36、1.32、1.45、1.39g/cm^3,80—200cm 土层均以 1.48g/cm^3计算。

1.2 试验设计

本试验共设 4 个处理,4 次重复,采用随机区组排列,小区面积为 170—470m^2。试验方案见表 2,处理一为农户模式,即按照当地农民的习惯施肥量和常用种植方式设置的对照处理;处理二为测控施肥,即测土配方施肥量+露地条播;处理三为垄膜沟播,即在测控施肥的基础上,在小麦生育期进行了垄膜沟播种植(垄上覆膜、沟内膜侧播种,垄宽与沟宽分别为 35cm 和 30cm,播种 2 行,行距 20cm);处理四为平膜穴播,是指在测控施肥的基础上,在小麦生育期全地面平铺地膜,且在膜上覆土,播种行距和穴距分别为 16cm 和 12cm。

本试验于 2014 年 10 月 1 日播种,在播种的同时进行地膜覆盖,2015 年 6 月 7 日收获,供试小麦品种为长 8744 号,播量均为 150kg/hm^2,冬小麦生育期不进行灌溉。所施氮肥为尿素(含 N 46%),磷肥为过磷酸钙(含 P_2O_5 11%),钾肥为氯化钾(含 K_2O 60%),均作为底肥在播前施入土壤并翻入耕层耙平。

表 2 试验方案

Table 2 The experiment design

处理 Treatments	养分用量/(kg/hm^2) Nutrient input $N-P_2O_5-K_2O$	夏闲覆盖 Cover in summer fallow period	耕作方式 Tillage methods	栽培方式 Patterns
农户模式 Farmer mode	150—60—0	秸秆留茬 30cm 覆盖	伏天耕 1 次,播前旋 1 次	常规平作,播前浅旋耕深度 13cm,耙耱后播种,行距 20cm
测控施肥 Measurement-control treatment	51—83—53	同上	同上	同上
垄膜沟播 Ridge film furrow sowing	同测控施肥	小麦收获后,继续保持垄上覆膜、沟内秸秆留茬 30cm 覆盖	播前耕 1 次,旋 1 次	垄上覆膜、沟内膜侧播种,播种 2 行,行距 20cm,垄宽 35cm,沟宽 30cm
平膜穴播 Flat film dibble	同测控施肥	小麦收获后,继续保持地膜平覆、秸秆留茬 30cm 覆盖	同上	全地面平铺地膜,膜上覆土厚度 0.5—1cm 左右。播种深度 3—5cm,行距 15—16cm,穴距 12cm,采用 120cm 的膜时每幅膜播 7—8 行

1.3 样品采集

播前、收获后,分别在各小区每 20cm 为一层,共采集 2m 土层混合土样,测定土壤含水量、硝态氮的含量。在小麦收获期,各小区随机收获 $2m^2 \times 3 = 6m^2$脱粒计产;同时收获各小区中所标记的 3×1m 的小麦样段,并测算小麦产量构成三要素(公顷穗数、穗粒数、千粒重)等指标。

1.4 分析项目及测定方法

(1)土壤含水量的测定:烘干法;

(2)土壤硝态氮测定:称取充分混匀的新鲜土样 5g,加入 0.01mol/L $CaCl_2$ 50mL 浸提,振荡 30min,过滤,取滤液,使用 AA3(Auto Analyzer 3)型流动分析仪测定土壤硝态氮含量。

1.5 计算方法

(1)收获指数(HI%)= 籽粒产量/地上部分生物量×100

(2)土壤贮水量(mm)= 土壤质量含水量(%) ×土壤容重 (g/cm^3) × 土层厚度(cm) /10

(3)水分利用率= 籽粒产量(kg/hm^2)/耗水量(mm)

$$ET_{1-2} = \Delta W + P_0 + K - R$$

式中,ET_{1-2}为阶段耗水量(mm);ΔW 为该阶段土壤贮水量的变化量(mm),即土壤贮水消耗量;R 为地表径流量(mm);P_0为有效降水量(mm);K 为该时段内的地下水补给量(mm),本试验所在地平坦,同时地下水埋藏很深,因此径流和地下补给量忽略不计。小麦生育期降雨量由当地气象部门提供。

(4)降水生产效率(kg hm^{-2} mm^{-1})= 籽粒产量(kg/hm^2)/降水量(mm)

(5)水分休闲效率(%)= 夏季休闲期土壤 0—200cm 土层贮水增加量(mm)/夏闲期降水量(mm)×100%

(6)土壤硝态氮累积量(kg/hm^2)= 土层厚度(cm)×土壤容重(g/cm^3)×土壤硝态氮含量(g/kg)/10

(7)氮表观矿化量(kg/hm^2)= 对照区地上部分吸氮量 + 对照区收获后土壤残留 N_{min}量−对照区播前土壤无机氮量

(8)氮表观损失量(kg/hm^2)= (施氮量+播前土壤 N_{min}量+氮表观矿化量)−(作物吸收氮量+收获后土壤残留 N_{min}量)

1.6　数据分析

运用 Excel 2003 和 DPS 软件进行实验数据处理和统计分析,用 Duncan 新复极差法进行分析比较。

2　结果与分析

2.1　不同覆膜方式对旱地小麦产量及产量构成的影响

2.1.1　不同覆膜方式对小麦产量的影响

不同覆膜方式下小麦籽粒产量、生物产量和收获指数的测定结果见图 1,由图 1 可知,各处理小麦的籽粒产量和生物产量分别在 4350.19—5662.15kg/hm^{2}和 9633.07—12823.33kg/hm^{2}之间,且各覆膜处理较不覆膜处理均有不同程度的提高[13]。其中平膜穴播和垄膜沟播处理与相同测控施肥量的不覆膜处理相比,籽粒产量分别增加 22.71%(P<0.01)和 9.46%(P<0.05),生物产量分别增加 25.45%(P<0.01)和 13.22%(P<0.01),这与 Du 等[14]研究一致,表明覆膜能够合理调控农田生态系统的小气候,更有利于小麦增产。同时,从收获指数来看,随着覆膜处理对产量的提高,其收获指数出现微弱的下降,但差异不显著。

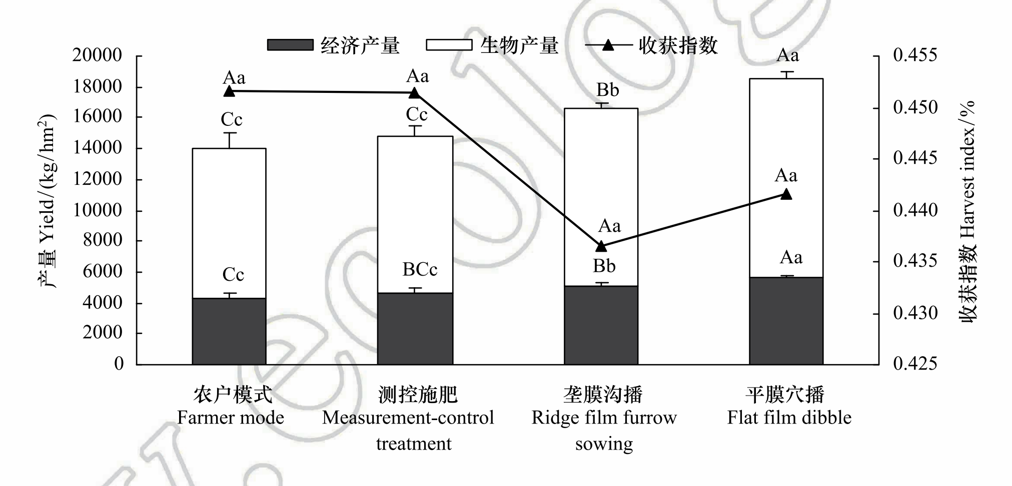


图 1　不同覆膜方式下小麦籽粒产量、生物产量和收获指数

Fig.1　Grain yield, biomass and harvest index of wheat under different film mulching methods

不同大写字母表示差异极显著(P<0.01),小写字母表示差异显著(P<0.05)

2.1.2　不同覆膜方式对小麦产量构成的影响

不同覆膜方式下旱地小麦公顷穗数、穗粒数和千粒重的测定结果见表 3,由表 3 可知,各处理公顷穗数、穗粒数和千粒重分别在 525.00—662.60(10^4 个/hm^2)、23.60—25.60(个/穗)和 41.30—43.80(g/1000 粒)之间。同时,各覆膜处理与不覆膜相比,产量构成三要素均有不同程度的提高。其中,平膜穴播和垄膜沟播处理与相同测控施肥量的不覆膜处理相比,公顷穗数分别提高 20.99%(P<0.01)和 17.09%(P<0.01)。与农户模式相比,覆膜处理的公顷穗数提高 22.15%—26.21%(P<0.01),说明在施肥量减少的情况下(农户模式的施肥量高于各覆膜处理)覆膜依旧提高了小麦的公顷穗数。由表 3 也可知,平膜穴播处理较测控施肥和农户模式的千粒重有一定的提高,分别提高 4.83%(P<0.05)和 5.97%(P<0.05)。各处理之间穗粒数的差异均不显著,对小麦产量的影响不大。

表 3 不同覆膜方式下小麦公顷穗数、穗粒数和千粒重

Table 3 Spikes per hectare, grain number and thousand grain weight of wheat under different film mulching methods

处理 Treatments	公顷穗数/(10^4个/hm^2) Spikes per hectare	穗粒数/(个/穗) Grain number	千粒重/(g/1000 粒) Thousand grain weight
农户模式 Farmer mode	525.00Bb	23.70Aa	41.30Ab
测控施肥 Measurement-control treatment	547.70Bb	23.60Aa	41.80Ab
垄膜沟播 Ridge film furrow sowing	641.30Aa	24.30Aa	42.10Aab
平膜穴播 Flat film dibble	662.60Aa	25.60Aa	43.80Aa

不同大写字母表示差异极显著(P<0.01),小写字母表示差异显著(P<0.05)

表 4 为小麦籽粒产量与产量构成之间的相关性分析结果,可知,小麦籽粒产量与公顷穗数、穗粒数及千粒重之间均达显著相关水平,而公顷穗数与籽粒产量之间的相关性最高(相关系数 r 值为 0.838**),说明公顷穗数能在很大程度上决定小麦产量,是小麦增产的关键因素之一。

表 4 小麦籽粒产量与产量构成的相关性分析

Table 4 Correlation analysis between grain yield and yield components of wheat

项目 Item	回归方程 Regression equation	相关系数/r Correlation coefficient	样品数 Sample number	r 显著临界值 Significance of the critical value of r
籽粒产量-公顷穗数 Grain yield-Spikes per hectare	y = 0.095x+125.9	0.838**	16	$r_{0.01}$ = 0.623
籽粒产量-穗粒数 Grain yield-Grain number	y = 0.001x+16.56	0.548*	16	$r_{0.05}$ = 0.497
籽粒产量-千粒重 *Grain yield-Thousand grain weight*	y = 0.001x+35.39	0.602*	16	

** 表示极显著相关(P<0.01), * 表示显著相关(P<0.05)

2.2 不同覆膜方式对旱地麦田土壤水分效应的影响

2.2.1 不同覆膜方式对 0—200cm 土层土壤贮水量的影响

不同覆膜方式下冬小麦种植前后 0—200cm 土层贮水量变化情况见图 2、图 3,由图 2、图 3 可知,各处理收获后的贮水量与播前相比,均有较大程度的降低,降幅为 125.57—192.98mm。同时,收获后两种覆膜处理的 2m 土层贮水总量较不覆膜均有极显著的降低,较相同测控施肥量的不覆膜处理降低 11.96%—15.06%(P<0.01),较农户模式降低 12.62%—15.70%(P<0.01)。张保军等人[15]在陕西淳化县进行了穴播地膜小麦土壤水分动态变化方面的研究,结果表明,在小麦越冬期地膜覆盖条件下的土壤含水量均高于露地条播,返青和拔节期 40—60cm 土层以上覆膜处理的土壤含水量略高于不覆膜处理,在孕穗期,覆膜处理低于不覆膜处理。分析原因可能为小麦进入营养生长和生殖生长期后对水分的强烈需求导致土壤水分的总体减少,而覆膜由于对农田土壤水分具有较强的调控能力,在小麦水分临界期会调控农田土壤水分以供给小麦吸收利用,从而促进小麦增产,这与本研究结果大致相似。

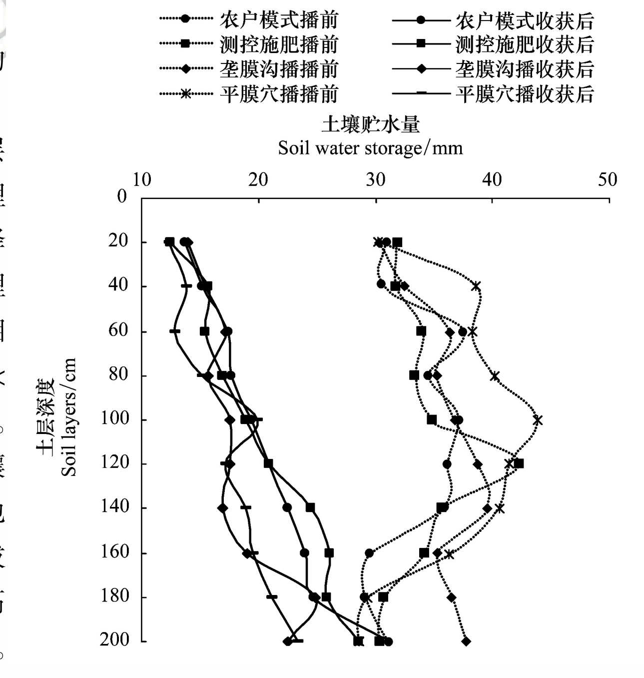


图 2 不同覆膜方式下冬小麦播前、收获后 0—200cm 土层贮水量变化情况

Fig.2 Changes of soil water storage of 0—200cm soil profile before sowing and after harvest of winter wheat under different film mulching methods

2.2.2 不同覆膜方式对土壤耗水量及水分利用率的影响

不同覆膜方式下旱地麦田土壤耗水量和水分利用率的测定结果见图 4,由图 4 可知,经过冬小麦的一个生育期,平膜穴播和垄膜沟播处理的耗水量均高于不覆膜处理。其中平膜穴播处理较不覆膜提高 29.47%—34.56%(P<0.01);垄膜沟播处理与不覆膜的测控施肥和农户模式相比,分别提高 19.06% 和 23.74%(P<0.05)。由图 4 也可知,两种覆膜处理较不覆膜处理的水分利用率虽有微弱的降低,但差异均不显著。

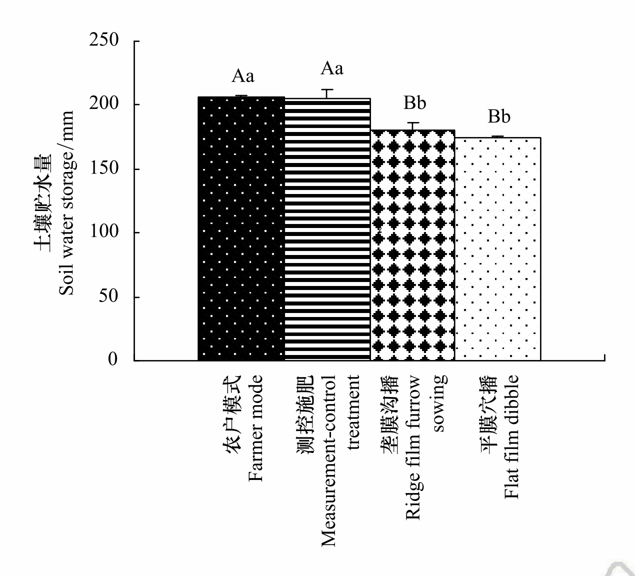


图 3　不同覆膜方式下冬小麦收获后 2m 土层贮水总量变化情况

Fig.3　Total amount of soil water storage of 2m soil profile under different film mulching methods after harvest of wheat

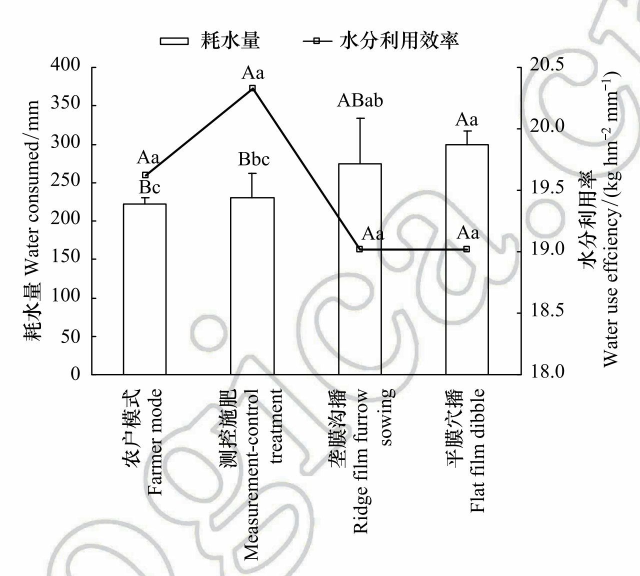


图 4　不同覆膜方式下旱地麦田 2m 土层耗水量及水分利用率变化情况

Fig.4　Changes of WUE and water consumed of 2m soil profile in dry wheat land under different film mulching methods

图 5 为不同覆膜方式下冬小麦种植前后 0—100cm 与 100—200cm 土层中土壤水分的消耗变化情况,可知,收获期各处理 0—100cm 土层的水分消耗明显高于 100—200cm 土层,说明小麦生长发育所消耗的水分主要来源于上层土体,这与陈玉华等[16]的研究结果基本一致,这主要是因为小麦根系虽然下扎深度超过 2m,但 90%的根系依旧集中在 1m 土层以上[17]。由图 5 也可知,平膜穴播和垄膜沟播处理在 100—200cm 土层的水分消耗情况分别占总量的 39.50%和 48.88%,而测控施肥和农户模式处理在 100—200cm 土层分别占总量的 35.75%和 30.84%,说明覆膜促进了小麦对深层土壤水分的调用。

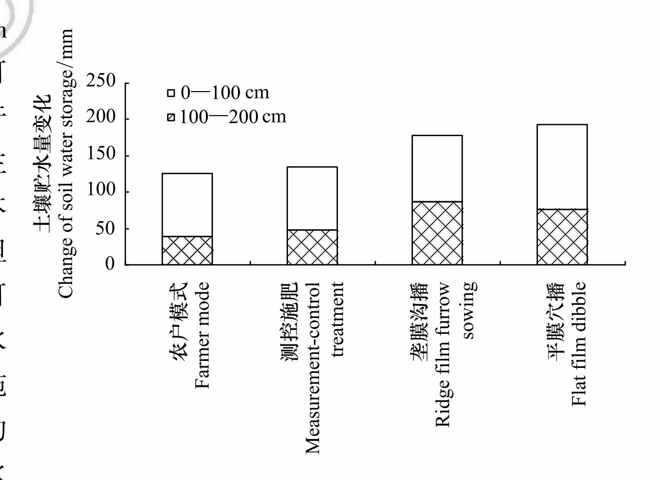


图 5　不同覆膜方式下冬小麦种植前后 0—100cm 与 100—200cm 土层土壤水分的消耗情况

Fig.5　Consumed of soil water storage of 0—100cm and 100—200cm soil profile before sowing and after harvest of winter wheat under different film mulching methods

2.2.3 不同覆膜方式对旱地麦田降水生产效率和休闲效率的影响

不同覆膜方式下旱地麦田降水生产效率测定结果见表 5,由表 5 可知,覆膜处理的降水生产效率较不覆膜处理均有显著的提高,且以平膜穴播处理效果最优。其中平膜穴播处理与测控施肥和农户模式相比,各时期(休闲期、生育期和年)均分别提高 22.71%(P<0.01)和 30.16%(P<0.01);垄膜沟播处理较不覆膜处理提高 9.46%—16.11%(P<0.05)。说明覆膜能有效蓄水保墒,从而提高旱地麦田的降水生产效率。

表 5 不同覆膜方式下旱地麦田 2m 土层降水生产效率变化情况

Table 5 Changes of rainfall production efficiency of 2m soil profile in dry wheat land under different film mulching methods

处理 Treatments	休闲期降雨量 Rainfall of leisure period/mm	生育期降雨量 Rainfall of growth stage/mm	年降雨量 Rainfall of year /mm	休闲期降水生产效率 Production efficiency of precipitation in leisure period /($kg\ hm^{-2}\ mm^{-1}$)	生育期降水生产效率 Production efficiency of precipitation in growth stage /($kg\ hm^{-2}\ mm^{-1}$)	年降水生产效率 Production efficiency of annual precipitation/($kg\ hm^{-2}\ mm^{-1}$)
农户模式 Farmer mode	413.30	95.90	509.20	10.53Cc	45.36Cc	8.54Cc
测控施肥 Measurement-control treatment	413.30	95.90	509.20	11.16BCc	48.11BCc	9.06BCc
垄膜沟播 Ridge film furrow sowing	413.30	95.90	509.20	12.22Bb	52.60 Bb	9.92Bb
平膜穴播 Flat film dibble	413.30	95.90	509.20	13.70Aa	59.04Aa	11.12Aa

不同覆膜方式下旱地麦田休闲效率的测定结果见表 6，由表 6 可知，两种覆膜处理与不覆膜相比，休闲效率均有不同程度的提高，且以平膜穴播处理提高幅度最大，较相同测控施肥量的不覆膜处理提高 23.22%，较农户模式提高 39.22%。垄膜沟播处理较测控施肥和农户模式分别提高 9.95%和 24.22%。总体来看，覆膜处理能在小麦休闲期有效蓄水保墒，从而为小麦生长发育提供良好的水分条件。

表 6 不同覆膜方式下旱地麦田 2m 土层休闲效率变化情况

Table 6 Changes of leisure efficiency of 2m soil profile in dry wheat land under different film mulching methods

处理 Treatments	收获后贮水量 Water storage after harvest/mm	播前贮水量 Water storage before sowing/mm	休闲期蓄水量 Water storage of leisure period/mm	休闲期降雨量 Rainfall of leisure period/mm	休闲效率 Leisure efficiency/%
农户模式 Farmer mode	214.66Aa	332.97Aa	118.30Aa	413.30	28.62Aa
测控施肥 Measurement-control treatment	206.48Aa	340.14Aa	133.66Aa	413.30	32.34Aa
垄膜沟播 Ridge film furrow sowing	212.62Aa	359.58Aa	146.96Aa	413.30	35.56Aa
平膜穴播 Flat film dibble	212.52Aa	377.22Aa	164.70Aa	413.30	39.85Aa

2.3 不同覆膜方式对 2m 土层土壤氮素平衡的影响

不同覆膜方式下冬小麦全生育期 2m 土层的氮素平衡计算情况见表 7，可知，氮输入分为 3 条途径：施氮肥、播前土壤中的无机氮量和矿化氮。农户模式的氮主要输入途径为施氮肥和播前土壤中的无机氮，分别占总输入量的 38.68%和 45.78%；其余 3 个处理主要以播前土壤中无机氮量和矿化氮作为氮输入的主要途径，分别占氮输入总量的 47.94%—50.62%和 34.11%—37.44%。

土壤中氮素的矿化是有机氮经过微生物的驱动，分解成简单化合物，并释放出矿质养分的过程，其矿化程度受农田微域环境的影响很大。由表 7 也可知，两种覆膜处理的矿化氮均高于不覆膜处理，较农户模式提高 96.71%—119.16%(P<0.01)；较相同测控施肥量的不覆膜处理虽然差异不显著，但仍提高 1.12%—12.66%。说明覆膜可以有效调节农田土壤的微域环境，有利于氮的矿化。

氮输出途径为：全生育期的作物吸收携出、残留的无机氮和氮表观损失量。作物吸收携出是小麦在全生育期因生长发育对氮素吸收利用而产生的一条氮输出途径，是氮素的有效输出。由表 7 也可知，平膜穴播和垄膜沟播处理的小麦吸氮量显著高于不覆膜处理，较测控施肥提高 9.98%—19.72%(P<0.05)，较农户模式提高 43.58%—56.29%(P<0.01)。说明覆膜可以合理调节土壤水热条件，有利于作物对氮的吸收利用。

表 7　不同覆膜方式下冬小麦全生育期 2m 土层中的氮素平衡

Table 7　Nitrogen balance across the whole growing season of winter wheat under different film mulching methods in 2m soil layers

项目 Items		处理 Treatments 农户模式 Farmer mode	测控施肥 Measurement-control treatment	垄膜沟播 Ridge film furrow sowing	平膜穴播 Flat film dibble
氮输入	施氮量	150.00	51.56	51.56	51.56
N input/(kg/hm^2)	播前	177.54Aa	158.79Aa	174.33Aa	169.05Aa
	矿化氮	60.24Bb	117.19Aa	118.51Aa	132.03Aa
	总输入	387.78	327.55	344.40	352.64
氮输出	作物吸收携出	102.43Cc	133.73Bb	147.07ABa	160.10Aa
N output/(kg/hm^2)	残留	186.48Aa	185.02Aa	183.21Aa	177.17Aa
	表观损失	98.87Aa	8.80Bb	14.11Bb	15.38Bb
	氮盈余	285.35	193.82	197.32	192.55

氮盈余包括残留的无机氮和氮表观损失量,是农业面源污染的主要污染源之一。由表 7 还可知,覆膜处理的氮素残留与不覆膜处理相比差异虽不显著,但仍呈现出一定的降低趋势,降低幅度达 1.75%—4.99%。而两种覆膜处理的氮表观损失量虽高于相同测控施肥量的不覆膜处理,但差异并不显著。总体来看,合理的覆膜+施肥可以有效降低氮素盈余,是控制面源污染、保护农业生态环境的重要措施。

3　结论与讨论

大量研究表明[18-21],覆膜因其优越的增温保墒作用,有效地调节农田小气候,提高作物穗数、穗粒数、籽粒容重等产量构成指标,从而起到增产作用。但也有研究表明[22],在小麦生长前期地膜覆盖可以增加作物耗水量,提高水分利用效率,但前期水分的过度消耗,不仅会导致小麦需水临界期提前,而且会导致小麦生长后期土壤水分条件的恶化,如无降水或无及时补充灌溉,土壤剖面中下部丰富的作物根系无法发挥作用,造成同化产物的浪费,影响作物后期生长和产量形成,导致小麦产量下降。何刚等[23]研究也发现,在丰水年由于水分不能作为小麦生产的限制因子,因此地膜覆盖的保水增产目的难以实现;在特别干旱的年份,地膜过度增加地温[24],从而缩短了灌浆时间,最终导致旱地小麦减产。本试验地点的年平均降雨量为 550mm,且本试验年份的年降雨量为 509mm,水分依旧是限制旱地麦田高产高效的主要因子,因此在本试验条件下平膜穴播和垄膜沟播处理依旧呈现出良好的增产效果,其籽粒产量较不覆膜处理显著提高 9.46%—22.71%。

杨长刚等人[25]在甘肃定西的研究发现,各覆膜处理的收获指数均低于不覆膜处理,这与本研究结果一致,这主要是因为覆膜加剧了小麦生长冗余,导致了干物质生产的浪费[26],通过栽培和育种的方式减缓小麦的生长冗余现象,从而将浪费的干物质量转化为经济产量,是提高小麦产量的重要途径。Mayer 等[27]研究发现,每平方米穗数和千粒重是影响冬小麦增产的主要因素,而穗粒数对产量提高的影响较小。赵倩等人[28]的研究表明,穗数在产量构成三要素中的栽培潜力最大,是增产的主要制约因素,这与本研究结果类似,因此采用合理的栽培措施以提高小麦的分蘖成穗率,从而间接地促进公顷穗数,对小麦增产起着决定性的作用。

杨长刚等人[29]在 2009—2010 年进行了有关覆膜对旱作小麦水分利用影响方面的研究,结果表明,各覆膜方式均提高了旱地麦田的耗水量,但水分利用率因年份而异,在 2010 年覆膜比露地条播处理低 4.40%。任书杰等人[30]的研究表明,在干旱年份覆膜会显著增加小麦耗水量,但无论底墒如何,全生育期覆膜对提高水分利用率没有实际意义。李凤民等人[22]的研究结果也表明,地膜覆盖显著增加小麦的耗水量,但收获期水分利用效率显著低于不覆膜处理。本试验结果与前人基本相似,原因可能是覆膜因相对较高的籽粒产量和生物产量,导致其对水分的过量消耗,从而降低了对水分的利用效率。但也有研究表明[31-32],覆膜能有效蓄水保墒、提高小麦生育期的耗水量,从而提高其水分利用率。

许多研究均表明[33-35],覆膜能促进深层土壤(100—200cm)中水分向上层土壤(0—100cm)的转移,本研

究也得出了相似的结论,原因可能有以下两方面:第一,覆膜加快了水分在土壤-植物-大气(SPAC)的运转[33],从而导致深层土壤贮水量的下降;第二,覆膜促进了小麦根系的下扎深度,从而促进了小麦对深层水分的吸收利用。

巨晓棠等[12]研究表明,施氮量、播前无机氮和矿化氮均在氮输入项中起着重要的作用,总输入量随着施氮量的增加而增加,且播前无机氮量和氮素矿化量占总输入量的比例随着施氮量的增加而下降,这与本研究结果基本一致。土壤中氮素的大量盈余可以为后季作物提供一定的氮肥环境,但容易在高强度降水或大量灌溉的条件下发生淋溶[9],或者通过氨挥发和反硝化作用而损失[36],从而对环境造成一定的潜在威胁。覆膜可以有效提高作物产量,同时降低农田土壤中硝态氮的残留[37]。He 等[38]研究表明,地膜覆盖可以有效抑制旱地麦田土壤水分蒸发,在促进冬小麦增产的同时,也降低了 2m 土层硝态氮的残留与损失。本研究结果表明,覆膜在一定程度上降低了土壤硝态氮的残留,但并没有降低氮的损失,这与陈小莉等人[39]的研究结果相似,这可能与土壤中氮矿化及作物对氮的吸收携出有关。

综上所述,平膜穴播和垄膜沟播处理均能有效提高冬小麦对土壤水分和氮素的吸收利用能力,从而提高了其公顷穗数,最终促进了小麦增产,且以平膜穴播覆膜方式效果最优。因此,这两种覆膜方式适宜在晋南乃至我国旱地麦区推广应用。但覆膜导致深层土壤贮水量降低这一发现也值得关注,长期覆膜是否会引发农田土壤水分严重缺失有待深入研究。

参考文献(References):

[1] 王学春, 李军, 蒋斌, 胡伟. 黄土高原不同降水类型区旱作玉米田土壤干燥化效应与土壤水分承载力模拟研究. 生态学报, 2009, 29(4): 2053-2066.

[2] 邓振镛, 张毅, 郝志毅. 半干旱半湿润气候区实施集雨节灌农业技术的研究. 中国农业气象, 2003, 24(4): 16-18, 22-22.

[3] 李儒, 崔荣美, 贾志宽, 韩清芳, 路文涛, 侯贤清. 不同沟垄覆盖方式对冬小麦土壤水分及水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2011, 44(16): 3312-3322.

[4] 王静. 半干旱地区春旱对春小麦生长发育的影响. 干旱区资源与环境, 1996, 10(3): 56-62.

[5] 肖国举, 王静. 黄土高原集水农业研究进展. 生态学报, 2003, 23(5): 1003-1011.

[6] 陆景陵. 植物营养学(上册). 北京: 北京农业大学出版社, 1994: 33-36.

[7] 胡田田, 李生秀. 土壤供氮能力测试方法的研究——Ⅳ 土壤剖面中的起始 NO_3^--N——可靠的土壤氮素有效性指标. 干旱地区农业研究, 1993, 11(Sl): 74-82.

[8] 苗艳芳, 李生秀, 扶艳艳, 王朝辉, 徐晓峰, 罗来超. 旱地土壤铵态氮和硝态氮累积特征及其与小麦产量的关系. 应用生态学报, 2014, 25(4): 1013-1021.

[9] 刘新宇, 巨晓棠, 张丽娟, 李鑫, 袁丽金, 刘楠. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 296-303.

[10] 侯云鹏, 韩立国, 孔丽丽, 尹彩侠, 秦裕波, 李前, 谢佳贵. 不同施氮水平下水稻的养分吸收、转运及土壤氮素平衡. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(4): 836-845.

[11] 杨宪龙, 路永莉, 同延安, 林文, 梁婷. 长期施氮和秸秆还田对小麦-玉米轮作体系土壤氮素平衡的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(1): 65-73.

[12] 巨晓棠, 刘学军, 张福锁. 冬小麦与夏玉米轮作体系中氮肥效应及氮素平衡研究. 中国农业科学, 2002, 35(11): 1361-1368.

[13] 高慧洲, 谢英荷, 李廷亮, 赵晓东, 余高, 岳丽, 加武斌. 覆膜对旱地冬小麦产量与土壤水分动态的影响. 山西农业科学, 2016, 44(12): 1793-1795, 1869-1869.

[14] Du Y J, Li Z Z, Li W L. Effect of different water supply regimes on growth and size hierarchy in spring wheat populations under mulched with clear plastic film. Agricultural Water Management, 2006, 79(3): 265-279.

[15] 张保军, 杨文平, 王银银. 穴播地膜小麦土壤水分动态变化研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2001, 29(4): 70-73.

[16] 陈玉华. 不同栽培模式对旱作冬小麦根系生长及水分利用的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.

[17] 赵秉强, 张福锁, 李增嘉, 李凤超, 史春余, 张骏, 张新春, 申加祥, 潘海军, 赵甲美, 尹玉波, 武传杰. 间作冬小麦根系数量与活性的空间分布及变化规律. 植物营养与肥料学报, 2003, 9(2): 214-219.

[18] He Z H, Xia X C, Peng S B, Lumpkin T A. Meeting demands for increased cereal production in China. Journal of Cereal Science, 2014, 59(3): 235-244.

[19] 何春雨, 周祥椿, 杜久元, 鲁清林, 张礼军, 周洁, 白斌, 周刚. 全膜覆土免耕穴播栽培技术对冬小麦产量效应的研究. 农业现代化研究, 2010, 31(6): 746-749.

[20] Rehman S, Khalil S K, Rehman A, Amanullah, Khan A Z, Shah N H. Micro-watershed enhances rain water use efficiency, phenology and productivity of wheat under rainfed condition. Soil and Tillage Research, 2009, 104(1): 82-87.

[21] 李廷亮, 谢英荷, 任苗苗, 邓树元, 单杰, 雷震宇, 洪坚平, 王朝辉. 施肥和覆膜垄沟种植对旱地小麦产量及水氮利用的影响. 生态学报, 2011, 31(1): 212-220.

[22] 李凤民, 鄢珣, 王俊, 李世清, 王同朝. 地膜覆盖导致春小麦产量下降的机理. 中国农业科学, 2001, 34(3): 330-333.

[23] 何刚, 王朝辉, 李富翠, 戴健, 李强, 薛澄, 曹寒冰, 王森, 刘慧, 罗来超, 黄明. 地表覆盖对旱地小麦氮磷钾需求及生理效率的影响. 中国农业科学, 2016, 49(9): 1657-1671.

[24] Zhou L M, Li F M, Jin S L, Song Y J. How two ridges and the furrow mulched with plastic film affect soil water, soil temperature and yield of maize on the semiarid Loess Plateau of China. Field Crops Research, 2009, 113(1): 41-47.

[25] 杨长刚, 柴守玺, 常磊. 半干旱雨养区不同覆膜方式对冬小麦土壤水分利用及产量的影响. 生态学报, 2015, 35(8): 2676-2685.

[26] 杨长刚, 柴守玺, 常磊, 杨德龙. 不同覆膜方式对旱作冬小麦耗水特性及籽粒产量的影响. 中国农业科学, 2015, 48(4): 661-671.

[27] Mayer J, Gunst L, Mäder P, Samson M F, Carcea M, Narducci V, Thomsen I K, Dubois D. Productivity, quality and sustainability of winter wheat under long-term conventional and organic management in Switzerland. European Journal of Agronomy, 2015, 65: 27-39.

[28] 赵倩, 姜鸿明, 孙美芝, 李林志, 辛庆国. 山东省区试小麦产量与产量构成因素的相关和通径分析. 中国农学通报, 2011, 27(7): 42-45.

[29] 杨长刚. 覆膜对旱作小麦水分利用及干物质生产的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.

[30] 任书杰, 李世清, 王俊, 凌莉, 李凤民. 半干旱农田生态系统覆膜进程和施肥对春小麦耗水量及水分利用效率的影响. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2003, 31(4): 1-5.

[31] 高艳梅, 孙敏, 高志强, 崔凯, 赵红梅, 杨珍平, 郝兴宇. 不同降水年型旱地小麦覆盖对产量及水分利用效率的影响. 中国农业科学, 2015, 48(18): 3589-3599.

[32] Qin S H, Zhang J L, Dai H L, Dai H L, Wang D, Li D M. Effect of ridge-furrow and plastic-mulching planting patterns on yield formation and water movement of potato in a semi-arid area. Agricultural Water Management, 2014, 131: 87-94.

[33] 宋婷, 王红丽, 陈年来, 张绪成. 旱地全膜覆土穴播和全沙覆盖平作对小麦田土壤水分和产量的调节机理. 中国生态农业学报, 2014, 22(10): 1174-1181.

[34] Gao Y H, Xie Y P, Jiang H Y, Wu B, Niu J Y. Soil water status and root distribution across the rooting zone in maize with plastic film mulching. Field Crops Research, 2014, 156: 40-47.

[35] Liu C A, Zhou L M, Jia J J, Wang L J, Si J T, Li X, Pan C C, Siddque K H M, Li F M. Maize yield and water balance is affected by nitrogen application in a film-mulching ridge-furrow system in a semiarid region of China. European Journal of Agronomy, 2014, 52: 103-111.

[36] 隽英华, 汪仁, 孙文涛, 邢月华. 春玉米产量、氮素利用及矿质氮平衡对施氮的响应. 土壤学报, 2012, 49(3): 544-551.

[37] Liu J L, Zhan A, Chen H, Luo S S, Bu L D, Chen X P, Li S Q. Response of nitrogen use efficiency and soil nitrate dynamics to soil mulching in dryland maize (*Zea mays* L.) fields. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2015, 101(2): 271-283.

[38] He G, Wang Z H, Li F C, Dai J, Ma X L, Li Q, Xue C, Cao H B, Wang S, Liu H, Luo L C, Huang M, Malhi S S. Soil nitrate-N residue, loss and accumulation affected by soil surface management and precipitation in a winter wheat-summer fallow system on dryland. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2016, 106(1): 31-46.

[39] 陈小莉, 李世清, 王瑞军, 任小龙, 李生秀. 半干旱区施氮和灌溉条件下覆膜对春玉米产量及氮素平衡的影响. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(4): 652-658.